



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

Caractérisation Hydro-Chimique et Évaluation de la Qualité des Eaux Souterraines de l'Environnement Minier du Canton Afema (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

Kouadio Assemien François Yao

Université de Man,

UFR des Sciences Géologiques et Minières, Côte d'Ivoire

Kouassi Ernest Ahoussi

Yao Blaise Koffi

Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM, Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG) Côte d'Ivoire

Lou Moin Sandrine Tivoli

Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny de Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

David Salze

ATDx Sarl, Aménagement-Territoire-Développement, France

Miguel Lopez-Ferber

Hydrosciences Montpellier, Univ Montpellier, IMT Mines Ales, IRD, CNRS, Ales, France

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n6p248](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p248)

Submitted: 14 November 2022

Accepted: 21 February 2023

Published: 28 February 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Yao K.A.F., Ahoussi K.E., Tivoli L.M.S., Salze D. & Lopez – Ferber M. (2023). *Caractérisation Hydro-Chimique et Évaluation de la Qualité des Eaux Souterraines de l'Environnement Minier du Canton Afema (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (6), 248. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p248>

Résumé

Le Canton Afema situé dans le département d'Aboisso a connu une exploitation minière de 1992 à 1998. A la fin de l'exploitation les sites n'ont pas subi de réels travaux de réhabilitation. Afin de déterminer l'impact de ces activités minières sur les caractéristiques physico-chimiques et la qualité des eaux souterraines, cette étude a été entreprise. Les résultats des analyses d'eaux collectées dans la zone minière ont été traités à l'aide du diagramme triangulaire de Piper et de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). L'approche méthodologique a consisté d'abord à déterminer les hydro-faciès

des eaux étudiées puis à les répartir en différents groupes sur la base de leur ressemblance hydro-chimique et à identifier les facteurs susceptibles d'expliquer à la fois l'origine des paramètres étudiés et leur corrélation. Enfin, la qualité globale de ces eaux a été estimée à partir du calcul de l'indice de qualité. Les résultats ont montré que les eaux étudiées étaient réparties en deux grandes familles : les eaux chlorurées calciques et magnésiennes et les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes. Elles étaient dans l'ensemble faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique moyenne de 195,76 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cette minéralisation était contrôlée par deux phénomènes essentiels, le temps de séjour de l'eau dans les aquifères et l'infiltration superficielle et le lessivage des terrains non saturés. La qualité physico-chimique des eaux souterraines étudiées était conforme aux normes de potabilité recommandées par l'OMS. Cependant, les résultats ont aussi montré de fortes teneurs en cadmium ($0,052 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et en plomb ($0,058 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) ; ce qui était responsable de la mauvaise qualité globale de ces eaux selon l'indice de qualité. Ainsi, la consommation des eaux étudiées par les populations locales constitue un danger pour leur santé.

Mots-clés: Exploitation minière, pollution métallique, ressources en eaux, indice de qualité, Afema

Hydrochemical Characterization and Assessment of Groundwater Quality in the Mining Environment of Afema Township (South-East of Côte d'Ivoire)

Kouadio Assemien François Yao

Université de Man,
UFR des Sciences Géologiques et Minières, Côte d'Ivoire

Kouassi Ernest Ahoussi

Yao Blaise Koffi

Université Félix Houphouët-Boigny, UFR STRM, Laboratoire des Sciences
du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG) Côte d'Ivoire

Lou Moin Sandrine Tivoli

Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny de Yamoussoukro,
Côte d'Ivoire

David Salze

ATDx Sarl, Aménagement-Territoire-Développement, France

Miguel Lopez-Ferber

Hydrosciences Montpellier, Univ Montpellier, IMT Mines Ales, IRD,
CNRS, Ales, France

Abstract

Afema Township, located in the department of Aboisso, was mined from 1992 to 1998. At the end of the exploitation, the sites did not undergo any real rehabilitation work. In order to determine the impact of these mining activities on the physicochemical characteristics and quality of groundwater, this study was undertaken. The results of the water analyses collected in the mining area were processed using Piper's triangular diagram and Principal Component Analysis (PCA). The methodological approach consisted, first of all, in determining the hydro-facies of the waters studied, then in dividing them into different groups on the basis of their hydro-chemical similarity and in identifying the factors likely to explain both the origin of the parameters studied and their correlation. Finally, the overall quality of these waters was estimated from the calculation of the quality index. The results showed that the waters studied were divided into two main families: chloride-calcium-magnesium waters and bicarbonate-calcium-magnesium waters. They were on the whole weakly mineralized, with an average electrical conductivity of 195.76 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. This mineralization was controlled by two essential phenomena, the residence time of water in the aquifers and surface infiltration and leaching from unsaturated ground. The physico-chemical quality of the groundwater studied complied with the standards of potability recommended

by the WHO. However, the results also showed high levels of cadmium (0.052 mg.L-1) and lead (0.058 mg.L-1); this explained the overall poor quality of these waters according to the water quality index. Thus, the studied waters presented a real risk for human consumption. The consumption of these waters by local communities exposes them to health risks.

Keywords: Mining, metal pollution, water resources, water quality index, Afema

Introduction

Le développement des sociétés modernes est fondé sur la nécessité de répondre à une demande des biens et services. L'industrie doit donc évoluer et s'adapter pour être en mesure de fournir et de mettre sur le marché ces produits (Kogel et al., 2006). La première étape de ce processus est la mise à disposition de matières premières pour la transformation et le traitement ultérieur. L'industrie minière joue un rôle important dans la chaîne d'approvisionnement en matières premières (Castilla-Gómez & Herrera-Herbert, 2015). Cependant, est-il possible d'extraire des minéraux de la croûte terrestre sans nuire à l'environnement ? Plusieurs auteurs ont montré que les activités minières sont souvent considérées comme une source majeure de propagation de métaux contaminants dans l'environnement (Monteiro et al., 2012 ; Omanović et al., 2015 ; Othmani et al. 2015). Cela est dû non seulement à l'utilisation de produits chimiques tels que le cyanure et le mercure mais aussi au fait que beaucoup de déchets miniers sont fréquemment abandonnés avec peu ou pas de travaux de restauration. La mauvaise gestion des résidus miniers peut générer la migration de métaux dans le milieu environnant, contribuant ainsi à la contamination des substrats du sol, à la destruction du paysage écologique et à la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines (Othmani et al., 2015). La contamination des eaux par les métaux lourds, qu'elle soit d'origine naturelle ou anthropique, est l'un des problèmes environnementaux en raison de son impact sur la santé publique (Makhoukh et al., 2011; Lakhili et al., 2015).

Les problèmes de pollution de l'eau, en particulier par les métaux lourds, suscitent désormais des inquiétudes dans le monde entier. Ces questions sont encore plus préoccupantes dans les pays en voie de développement en raison de la souplesse, supposée ou avérée, des législations. En Côte d'Ivoire, plusieurs auteurs, se sont intéressés à la contamination métallique des écosystèmes en général (Coulibaly et al., 2011 ; Kouassi et al., 2012 ; Keumean et al., 2013) et des environnements miniers en particulier (Yapi al., 2014 ; Yao et al., 2017; Yao & Ahoussi, 2020; Ouattara et al., 2022). Ces études ont, dans leur majorité, détecté des pollutions métalliques dans certains milieux aquatiques. Dès lors, cette préoccupation touche de

nombreuses régions soucieuses de maintenir leurs ressources hydriques à un haut niveau de qualité. C'est le cas du canton Afema, situé dans le sud-est de la Côte d'Ivoire où, la Société des Mines de l'Afema (SOMIAF) a exploité une mine d'or de 1992 jusqu'à 1998, date de sa fermeture. Cette fermeture a été réalisée sans de réels travaux de réhabilitation préalable. Parmi les sites d'exploitation abandonnés, certains ont été convertis en terrains agricoles, alors que les anciennes fosses sont aujourd'hui remplies d'eau s'écoulant vers les cours d'eau voisins. Les travaux de Yao et al., 2017 ont montré une contamination métallique de ces cours d'eau. L'objectif de ce présent travail était de déterminer l'impact potentiel de ces activités minières sur les caractéristiques physico-chimiques et la qualité globale des eaux souterraines de cette région.

Présentation de la zone d'étude

Le canton Afema est situé dans le royaume Sanwi, au Sud-est de la Côte d'Ivoire, à la frontière du Ghana. Il appartient à la région du Sud-Comoé, dans le département d'Aboisso. Située à environ 130 km de la capitale économique, Abidjan, la zone d'étude s'étendait sur plus de 850 km², correspondant à la superficie des 2 bassins versants d'Ehania et de Noé. Cette délimitation tenait compte de la zone d'influence des activités minières sur le milieu naturel (Figure 1). Le climat de la zone d'étude est de type équatorial de transition toujours humide appelé localement « climat *attiéen* ». Le climat est caractérisé par l'abondance des précipitations avec plus de 1600 mm/an. La géologie de la zone d'étude est constituée d'un socle et d'une petite couverture sédimentaire. Les formations rocheuses se regroupent en deux grands ensembles principaux : les métavolcanites et les métasédiments (Assié, 2008). Ces deux ensembles sont séparés par la zone de contact orientée NE-SW, représentant la zone minéralisée (Figure 2).

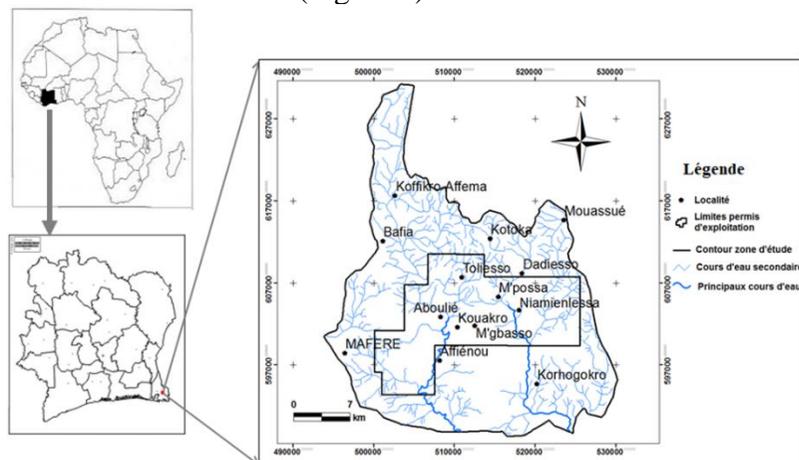


Figure 1. Situation géographique de la zone d'étude

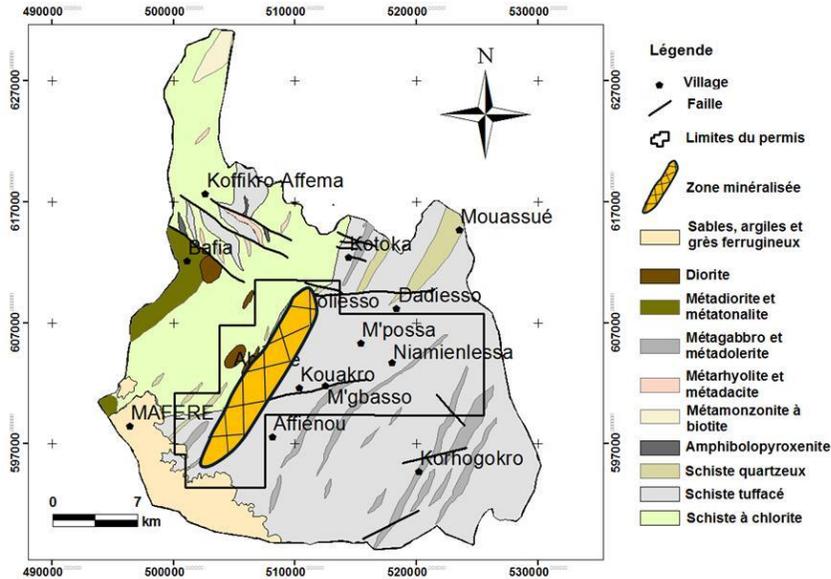


Figure 2. Carte géologique de la zone d'étude

Matériel et méthodes

Méthode d'échantillonnage et d'analyse

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée en Février 2016 et a concerné 14 points d'eaux souterraines. Les échantillons d'eaux souterraines étaient composés de 8 points d'eau de forages (Af F1, To F1, To F2, Da F1, Da F2, N1, Kt F1 et Kt F2) et de 6 points d'eau de puits (Km, Cp-M, K1, K2 et Mg) qui correspondaient à la totalité des ouvrages présents et en état de fonctionnement sur le territoire de la zone d'étude (Figure 3). Les échantillons d'eau prélevés ont été conservés dans des flacons en polyéthylène (1 L). Ces flacons ont été remplis d'eau à ras-bord puis fermés hermétiquement en évitant qu'ils contiennent des bulles d'air.

Le protocole de prélèvement était celui préconisé par Thierrin et al. (2001). Il a consisté tout d'abord à rincer le matériel de prélèvement et de mesures (électrodes du multi-paramètre) avec de l'eau distillée puis trois fois de suite avec l'eau à échantillonner. Ensuite, un autre prélèvement a servi aux mesures *in situ*. Le même principe a été respecté pour le prélèvement des échantillons destinés aux mesures en laboratoire. Dans les échantillons prévus pour le dosage des métaux, trois gouttes d'acide nitrique (HNO_3) ont été ajoutées afin de les stabiliser. Tous les échantillons ont été enfin conservés à l'abri de la lumière et à moins de 4°C dans des glacières puis convoyés au laboratoire.

Les paramètres analysés au Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL) étaient les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), le pH, la Conductivité Électrique (CE), la température, le potentiel d'oxydoréduction

(Eh), les matières en suspension (MES) et les métaux comme l’Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Mercure (Hg), le Chrome (Cr), le Plomb (Pb) et les Cyanures (CN). Les ions majeurs ont été dosés à l’aide d’un spectrophotomètre de type Hach DR6000. Les métaux ont été dosés sur un spectromètre d’absorption atomique (SAA). La limite de détection de ces appareils était de 0,001 mg.L⁻¹.

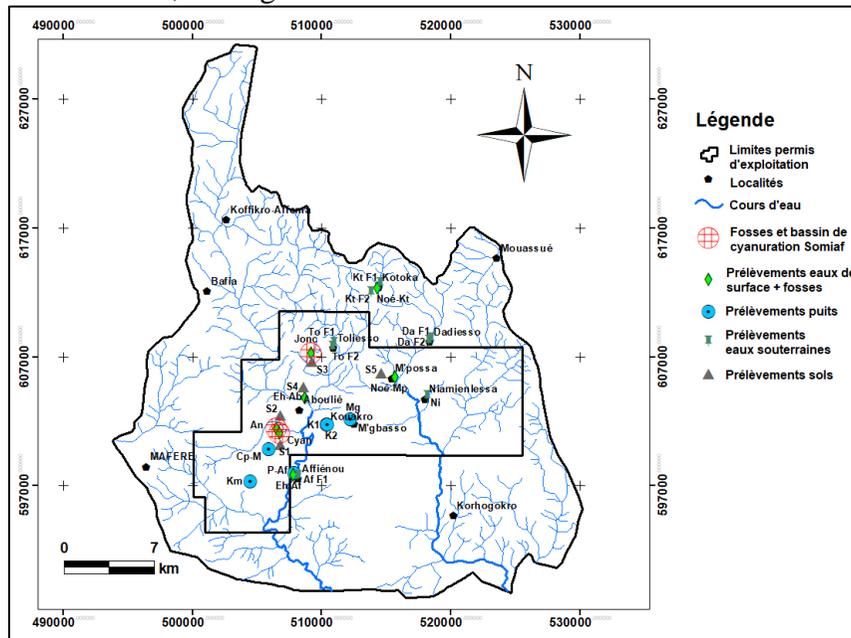


Figure 3. Répartition des points de prélèvement (Af F1 : Affiéno Forage 1 ; To F1 : Toliesso Forage 1 ; To F2 : Toliesso Forage 2 ; Da F1 : Dadiesso Forage 1 ; Da F2 : Dadiesso Forage 2 ; Ni : Niamienlessa (Forage); Kt F1 : Kotoka Forage 1 ; Kt F2 : Kotoka Forage 2 ; Km : Kouamékro (Puits) ; Cp-M : Campement-Mine ; K1 : Kouakro Puits 1 ; K2 : Kouakro Puits 2 et M’gbasso (Puits)).

Méthode d’échantillonnage et d’analyse

Le traitement des données a été réalisé à l’aide des logiciels STATISTICA 7.1, pour le traitement statistique des variables et également pour l’Analyse en Composantes Principales et DIAGRAMME 6.1, pour la détermination des hydro-faciès à partir du diagramme de PIPER.

Analyse des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines

Détermination des hydro-faciès des eaux souterraines

La caractérisation hydro-chimique des eaux a été réalisée à l’aide du diagramme de Piper. Ce diagramme, couramment utilisé avec de bons résultats (Kouzana et al., 2007 ; Oga et al., 2009), a permis de rendre compte de la répartition des points d’eau dans les faciès hydro-chimiques.

Analyse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Cette étude était destinée à réduire le nombre de paramètres statistiques et à trouver les coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés. Pour cela, l'Analyse en Composantes Principales a été utilisée afin de mettre en évidence les ressemblances hydro-chimiques entre les différentes eaux pour en extraire des variables représentatives (Guillén et al., 2012). Aussi, elle a été utilisée pour identifier les facteurs susceptibles d'expliquer à la fois l'origine des paramètres étudiés et leur corrélation (Sielaff et Einax, 2007 ; Ahoussi, 2008 ; Idris, 2008 ; Dahariya et al., 2016). Les statistiques exprimées étaient les valeurs extrêmes (minimum, maximum), la moyenne (valeur centrale) et l'écart-type (paramètre de dispersion).

Évaluation de l'indice de qualité des eaux (Water Quality Index)

L'indice de qualité de l'eau est une des techniques les plus efficaces permettant d'évaluer la qualité des eaux. Il est défini comme étant une estimation de la qualité de l'eau sur la base de l'influence de plusieurs paramètres (Ramakrishnaiah et al., 2009). Le calcul est effectué en particulier sur l'aptitude d'une eau à la consommation humaine. Pour ce faire, plusieurs étapes sont nécessaires :

– le choix et la pondération des paramètres physico-chimiques retenus pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Un poids (w_i) est affecté à un paramètre en tenant compte de son importance relative dans l'évaluation de la qualité totale d'une eau destinée à la consommation humaine. Dans l'exemple du Tableau 1, le poids maximal de 5 a été assigné aux nitrates en raison de leur importance majeure dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Ramakrishnaiah et al., 2009). De même, le poids 5 a été attribué aux métaux lourds comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), l'arsenic (As), etc. En effet, du fait de leur caractère non-biodégradable, et de leur toxicité, les métaux lourds représentent un danger pour la santé humaine (Shrestha et al., 2016). Cependant, le magnésium a été affecté du poids 1 car il ne présente pas de réels effets nuisibles à la santé humaine ;

– le calcul du poids relatif (W_i) de chaque paramètre (Tableau 1) est effectué en suivant l'équation (1) :

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Avec,

w_i : le poids affecté à chaque paramètre et ;

n : le nombre de paramètres retenus.

Tableau 1. Pondération des paramètres de qualité

Paramètres chimiques	Poids (w_i)	Poids relatif (W_i)	Normes OMS
PH	4	0,083	6,5 – 9
Conductivité électrique ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	4	0,083	200 – 1100
Turbidité (UTN)	2	0,041	1
Nitrates (mg.L^{-1})	5	0,104	50
Chlorures (mg.L^{-1})	3	0,062	250
Sulfates (mg.L^{-1})	4	0,083	250
Calcium (mg.L^{-1})	2	0,041	75
Magnésium (mg.L^{-1})	2	0,041	30
Sodium (mg.L^{-1})	2	0,041	200
Mercure (mg.L^{-1})	5	0,104	0,001
Plomb (mg.L^{-1})	5	0,104	0,01
Cyanure (mg.L^{-1})	5	0,104	0,05
Cadmium (mg.L^{-1})	5	0,104	0,005
Total	48	1	

– la détermination d'une échelle d'estimation de la qualité (q_i) pour chaque paramètre en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par une valeur guide puis en multipliant le résultat par 100. L'équation (2) illustre le calcul de q_i :

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Où q_i désigne la qualité de l'eau estimée par rapport au paramètre i ;

C_i , la concentration en mg.L^{-1} de chaque paramètre mesurée dans chaque échantillon d'eau ;

S_i , la valeur guide proposée pour les eaux de boisson.

– la détermination de l'indice de qualité de l'eau (IQE) a été effectuée à partir des équations (3) et (4) :

$$SI_i = W_i * q_i \quad (3)$$

$$IQE = \sum SI_i \quad (4)$$

Où SI_i , l'indice partiel (ou sous-indice), désigne l'indice de qualité pour un paramètre i donné. Il est calculé pour chaque paramètre et la somme de tous les SI_i permet d'obtenir l'indice de qualité de l'eau du site concerné (IQE). Le regroupement des valeurs de IQE comme indiqué dans le Tableau 2 permet de classer les eaux étudiées. Les classes sont au nombre de 5 et vont de « eaux excellentes » à « eaux impropres à la consommation humaine » au regard des paramètres retenus.

Tableau 2 .Classification des eaux basée sur les valeurs de l'Indice de Qualité des Eaux (IQE)

Valeurs IQE	Qualité des eaux
< 50	Excellente qualité
50 – 100	Bonne qualité
100 – 200	Qualité médiocre
200 – 300	Qualité mauvaise
> 300	Eau impropre à la boisson

Résultats

Classification hydrochimique des eaux d'Afema

Les eaux souterraines de la zone d'Afema se répartissent en deux hydro-faciès (Figure 4):

- les eaux chlorurées calciques et magnésiennes : ce faciès était le plus dominant et correspondait à 12 (sur 14) échantillons d'eaux souterraines de la zone d'étude. Il est caractérisé par une prédominance des chlorures sur les bicarbonates pour les anions et des alcalino-terreux sur les alcalins pour les cations.

- les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes : elles correspondaient à seulement 2 échantillons (Figure 4). Les points d'eau concernés étaient ceux de Kotoka et Dadiesso. Ce faciès caractérise donc les eaux des aquifères fissurés puisqu'aucun puits n'est concerné. Les bicarbonates, le calcium et le magnésium ($\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$) étaient les ions dominants observés dans les eaux de la zone d'étude. La plus forte minéralisation des eaux ($\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$) s'explique par des circulations naturelles très faibles dans le socle, donc des eaux très peu renouvelées, avec un temps d'interaction eau-roche long.

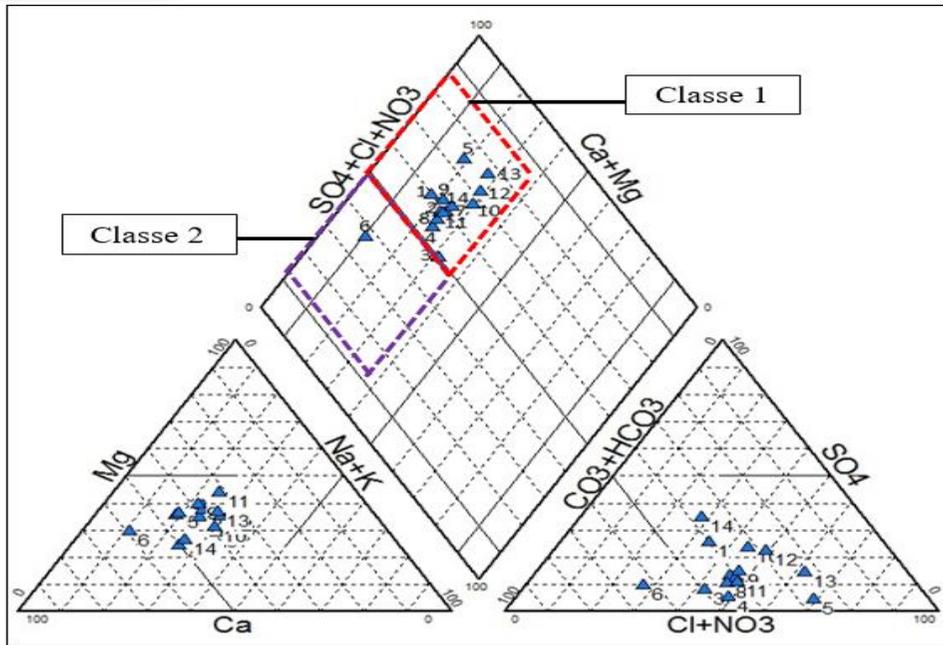


Figure 4. Classification hydrochimique des eaux souterraines dans le diagramme de Piper : (1) Eaux chlorurées calciques et magnésiennes ; (2) Eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

Caractérisation physico-chimique des eaux d’Afema

Outre les 18 paramètres consignés dans le Tableau 3 synthétisant les résultats d’analyse, le mercure, le chrome et l’arsenic ont été dosés. Cependant, ces éléments n’ont pas été détectés. Ainsi, dans la suite de cette étude, il sera considéré que le mercure, le chrome et l’arsenic n’étaient pas présents dans les eaux souterraines de la zone d’étude.

Paramètres physiques

La température des eaux souterraines est comprise entre 24,9 (Puits 1 à Kouakro) et 26,9°C (Campement mine) avec une moyenne de 25,95°C qui est sensiblement égale à la température atmosphérique. Le pH variait de 5,17 à 8,50 ; ce qui a permis de classer les eaux de le domaine des eaux à alcalinité bicarbonatée ($4,5 < \text{pH} < 9,5$). Les eaux d’Afema étaient faiblement minéralisées. La conductivité électrique de ces eaux variait de 31,7 à 547 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ avec une moyenne de 135,5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Tableau 3).

Les valeurs de turbidité variaient de 1,00 à 60,00 NTU, avec une valeur moyenne de 18,04 NTU. Ces valeurs montrent que les eaux de la région étaient par endroit chargées en éléments en suspension comme l’ont témoigné les valeurs de MES. En effet, les de MES oscillaient entre 0,72 et 80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Pour ce qui concerne le potentiel d’oxydo-réduction, outre le Forage 1 de Dadiesso qui a une valeur négative (-85,30 mV), les eaux souterraines de la zone d’étude

avaient des valeurs positives. Ces valeurs variaient de 25,7 à 111,1 mV avec une moyenne de 54,34 mV (Tableau 3). Ces eaux étaient dans l'ensemble moyennement oxygénées.

Tableau 3. Variables statistiques et valeurs extrêmes

Paramètres	Unités	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
PH	-	5,17	8,50	6,30	0,75
Température	°C	24,90	26,90	25,95	0,58
Potentiel redox	mV	-85,30	111,10	44,36	44,22
Conductivité	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	31,70	547,00	195,76	135,50
MES	-	0,720	80,00	22,66	24,23
Turbidité	UTN	1,00	60,00	18,04	19,40
Nitrate	mg.L^{-1}	4,27	7,80	6,18	1,10
Potassium	mg.L^{-1}	0,50	6,74	2,23	1,72
Sodium	mg.L^{-1}	1,69	8,20	4,91	2,32
Magnésium	mg.L^{-1}	1,48	6,80	4,52	1,58
Calcium	mg.L^{-1}	2,40	18,50	9,99	5,14
Chlorure	mg.L^{-1}	2,60	31,00	13,75	8,08
Sulfate	mg.L^{-1}	2,00	30,00	8,71	8,31
Bicarbonate	mg.L^{-1}	4,20	50,00	27,12	13,08
MT	mg.L^{-1}	10,92	131,4	70,42	35,12
Cyanure	mg.L^{-1}	0,00	0,014	0,00	0,00
Cadmium	mg.L^{-1}	0,014	0,052	0,02	0,01
Plomb	mg.L^{-1}	0,00	0,058	0,00	0,01

Paramètres chimiques

Les teneurs en nitrates des eaux étaient relativement faibles dans les eaux échantillonnées. Ces valeurs qui oscillaient entre 4,27 mg.L^{-1} et 7,8 mg.L^{-1} étaient bien en dessous de la valeur seuil admissible (50 mg.L^{-1}) proposée par l'OMS (2011) pour les eaux de boisson. Ainsi, les eaux de la région ne présentaient pas de contamination par les nitrates. Les bicarbonates étaient les ions les plus abondants dans les eaux étudiées. Leur concentration représentait 35% de la minéralisation totale, avec une valeur minimale de 4,2 mg.L^{-1} et une valeur maximale de 50 mg.L^{-1} . Les sulfates avaient des teneurs variant de 2 à 30 mg.L^{-1} , avec une moyenne de 8,71 mg.L^{-1} et un écart-type de 8,31 mg.L^{-1} (Tableau 3).

Concernant les cations majeurs, le calcium était le plus abondant, avec près de 13% de la minéralisation totale. La plus grande valeur (18,5 mg.L^{-1}) a été détectée dans le Puits 1 à Affiénou alors que la plus basse teneur (2,4 mg.L^{-1}) a été obtenue à M'Gbasso. Les teneurs en alcalins (Na^+ et K^+) étaient très faibles dans les eaux de la zone d' Afema ; ils représentaient seulement 9,23% de la MT. Les concentrations en sodium variaient de 1,69 à 8,20 mg.L^{-1} alors que les teneurs en potassium oscillaient de 0,5 à 6,74 mg.L^{-1} (Tableau 3). Tout comme le sodium et le potassium, le magnésium était aussi faiblement présent dans les eaux échantillonnées avec une valeur maximale de seulement 6,8

mg.L⁻¹.

Alors que pour les ions majeurs, les eaux étudiées ne présentaient aucun danger par rapport aux normes OMS (2011), la teneur en cadmium était particulièrement inquiétante pour l'ensemble de ces eaux. En effet, les teneurs relevées dépassaient la valeur guide de l'OMS qui est de 0,005 mg.L⁻¹. Les valeurs obtenues oscillaient entre 0,014 et 0,052 mg.L⁻¹. Par ailleurs, pour ce qui est du mercure les concentrations étaient très faibles. Elles étaient inférieures à 1 µg.L⁻¹ et ne présentaient aucune inquiétude vis-à-vis de la consommation des eaux. Par contre, pour le plomb, la valeur guide proposée par l'OMS (0,01 mg.L⁻¹) était dépassée dans l'eau du puits de Kouamékro. Dans le puits 2 à Kouakro, les analyses ont révélé que cette valeur guide était presque atteinte puisque la teneur en plomb dans ce puits s'élevait à 0,008 mg.L⁻¹.

Analyse en composantes principales

Matrice de corrélation des variables

Les relations qui existaient entre toutes les variables prises deux à deux ainsi que les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (Tableau 4). Il existe une forte corrélation entre deux variables lorsque le coefficient de corrélation existe et est supérieure ou égale à 0,50. L'analyse de ce Tableau a montré que certains paramètres étaient fortement corrélés. C'était par exemple le cas des alcalino-terreux Ca²⁺ et Mg²⁺ (r=0,81), Mg²⁺ et Cl⁻ (r=0,76) ou de Ca²⁺ et HCO₃⁻ (r=0,92). De même ces résultats ont montré que la conductivité électrique était bien corrélée avec tous les cations majeurs (0,81) avec K⁺ ; (r=0,72) avec Na⁺ ; (r=0,76) avec Mg²⁺ et (r=0,83) avec Ca²⁺. Cette corrélation était aussi bonne avec SO₄²⁻ (r=0,90) confirmant ainsi que tous ces éléments participent à la minéralisation. Ces corrélations montrent que les paramètres ci-dessus cités avaient une origine commune ou ils avaient en commun un phénomène naturel.

Valeurs propres et variances exprimées par les facteurs

Le pourcentage de variances exprimées était de 40,43% pour le facteur 1 ; 22,31% pour le facteur 2 et 13,39% pour le facteur 3 (Tableau 5). Ces trois premiers facteurs cumulaient 76,12% soit un peu plus de 75% des variances exprimées.

Tableau 4. Matrice de corrélations entre les variables

	pH	Eh	CE	Turb.	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Hg	CN	Cd	Pb
pH	1,0															
Eh	-0,99	1,0														
CE	0,27	-0,27	1,00													
Turb.	-0,36	0,36	-0,12	1,00												
NO₃⁻	0,24	-0,23	-0,11	-0,53	1,00											
K⁺	-0,17	0,17	0,81	-0,01	-0,25	1,00										
Na⁺	0,03	-0,03	0,72	0,06	-0,50	0,56	1,00									
Mg²⁺	0,22	-0,22	0,76	0,03	-0,12	0,47	0,74	1,00								
Ca²⁺	0,54	-0,54	0,83	-0,24	0,06	0,40	0,70	0,81	1,00							
Cl⁻	-0,01	0,00	0,46	0,24	-0,50	0,24	0,80	0,76	0,60	1,00						
SO₄²⁻	0,02	-0,02	0,90	-0,08	-0,03	0,85	0,56	0,68	0,62	0,25	1,00					
HCO₃⁻	0,7	-0,7	0,69	-0,39	0,18	0,26	0,60	0,66	0,92	0,38	0,47	1,00				
Hg	-0,13	0,13	0,63	0,09	-0,37	0,76	0,41	0,37	0,33	0,20	0,71	0,15	1,00			
CN	-0,14	0,14	0,41	0,37	-0,21	0,48	0,35	0,22	0,13	0,20	0,38	0,04	0,04	1,00		
Cd	-0,05	0,05	0,66	-0,09	-0,04	0,74	0,25	0,13	0,30	-0,05	0,63	0,19	0,60	0,23	1,00	
Pb	-0,11	0,11	0,36	0,31	-0,27	0,41	0,40	0,27	0,11	0,28	0,31	0,06	0,02	0,96	0,05	1,00

Il existe une forte corrélation entre deux variables lorsque le coefficient de corrélation existe et est supérieure ou égale à **0,50**.

pH : potentiel d'hydrogène ; **Eh** : potentiel d'oxydo-réduction ; **CE** : conductivité électrique ; **Turb.** : turbidité ; **NO₃⁻** : nitrates ; **K⁺** : potassium ; **Na⁺** : sodium ; **Mg²⁺** : magnésium ; **Ca²⁺** : calcium ; **Cl⁻** : chlorures ; **SO₄²⁻** : sulfates ; **HCO₃⁻** : bicarbonates ; **CN** : cyanure ; **Cd** : cadmium ; **Pb** : plomb.

Ce pourcentage était suffisant pour fournir les renseignements nécessaires à l'identification des phénomènes naturels responsables de la minéralisation des eaux souterraines. La Figure 5 illustre le plan défini par les facteurs F1 et F2. Dans cet espace factoriel, HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CE, SO_4^{2-} , Na^+ se regroupaient à l'extrémité négative de l'axe 1. Ce regroupement indique que les variables concernées évoluaient de la même façon et étaient tributaires d'un même ou de phénomènes semblables. Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- ont la particularité d'apparaître dans l'eau après un contact prolongé de celle-ci avec les roches encaissantes. Quant au facteur 2, il était déterminé par NO_3^- et pH regroupés à l'extrémité positive et la turbidité et le potentiel d'oxydo-réduction positionnés à l'extrémité négative de cet axe factoriel. La présence des NO_3^- sur l'axe F2 témoigne d'un apport superficiel. En effet, la présence des NO_3^- dans les eaux souterraines est indicatrice d'une origine superficielle due aux activités anthropiques telles que l'usage des intrants agricoles ou à la déforestation. Les NO_3^- parviennent aux eaux souterraines à partir des eaux de pluies qui s'infiltrent dans le sol. Ainsi, le facteur 2 a exprimé l'infiltration des eaux superficielles.

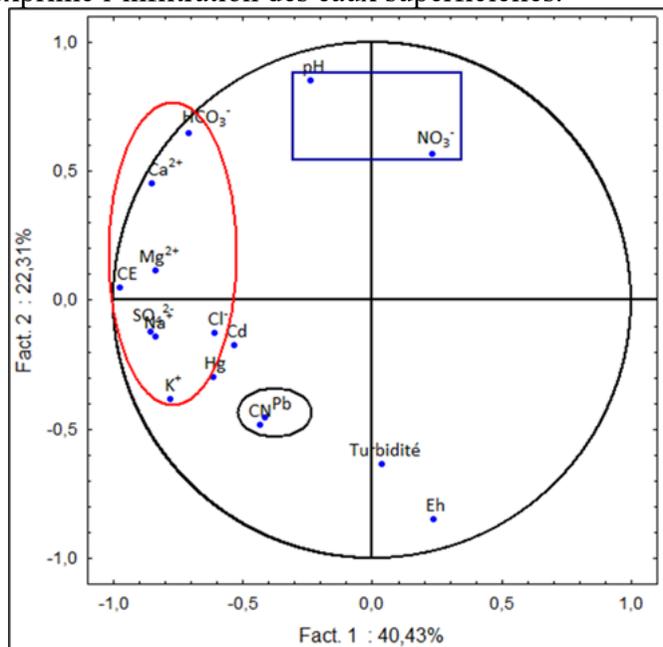


Figure 5. Espace des variables du plan factoriel F1 – F2

La distribution des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F2 (Figure 6), a indiqué la présence de fortes teneurs en nitrates dans l'échantillon 6 (forage 1 de Dadiesso) alors que les échantillons 10 (puits de Kouamékro), 12 (puits 2 à Kouakro), et 14 (puits à Affiéno) étaient caractérisés par une abondance en éléments majeurs tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- et

SO_4^{2-} . Les eaux de ces puits dont la profondeur était inférieure à 10 m ont été chargées en ces éléments depuis la surface par le mécanisme de l'infiltration des eaux de pluies où par l'hydrolyse des minéraux contenus dans les altérites.

Dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F3 (Figure 7), le facteur F1 était toujours déterminé par HCO_3^- , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , CE et Cl⁻. La proximité de ces variables dans le cercle de communauté a montré qu'elles commandaient le phénomène de mise en solution des ions. Ainsi, les éléments qui définissaient F1, provenaient d'un processus de mise en solution relativement rapide par conséquent un temps de séjour plus court. Le facteur 1 a donc exprimé le phénomène de minéralisation lié au temps de séjour. En outre, le facteur 3 était déterminé par le cadmium, le mercure et NO_3^- . La présence des nitrates dans les eaux étant d'origine anthropique, il a été déduit que le facteur 3 déterminait la minéralisation d'origine superficielle. L'inertie du plan F1-F3 des unités statistiques est illustrée à la Figure 8. Sur cette figure, les échantillons 1, 10, 12 et 14 étaient regroupés à l'extrémité négative de l'axe F1. Il s'agit des eaux fortement minéralisées de la zone d'étude qui s'opposent sur l'axe F1, aux eaux faiblement minéralisées caractérisées par les échantillons 2, 7, 8, 9, 11 et 13. Le troisième regroupement concernait les eaux à faibles teneurs en nitrates (échantillons 3, 4, 5 et 6). C'étaient les forages captant les eaux des réservoirs fracturés.

En définitive, l'ACP réalisée, a montré que deux phénomènes essentiels expliquaient la mise en solution des ions. Il s'agit du processus de minéralisation par hydrolyse lié au temps de séjour de l'eau dans les aquifères et la minéralisation par infiltration superficielle et lessivage des terrains non saturés.

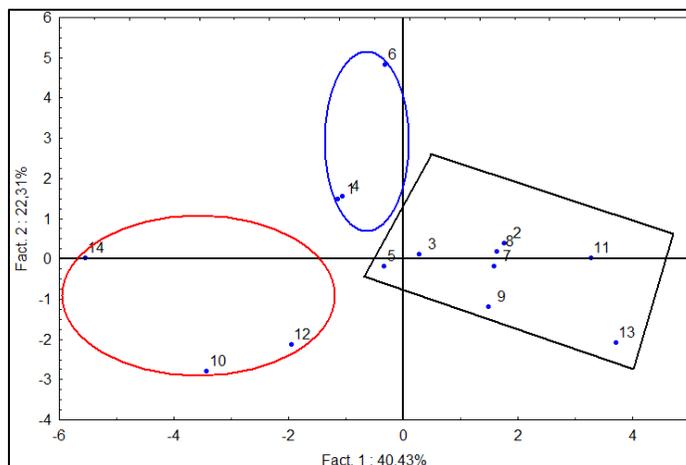


Figure 6. Espace des unités statistiques du plan factoriel F1 – F2

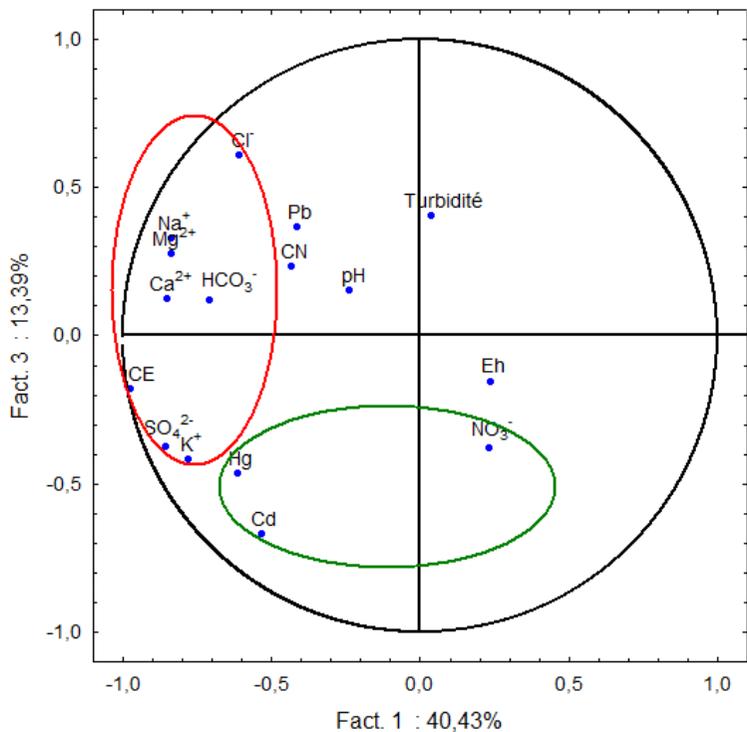


Figure 7. Espace des variables du plan factoriel F1 – F3

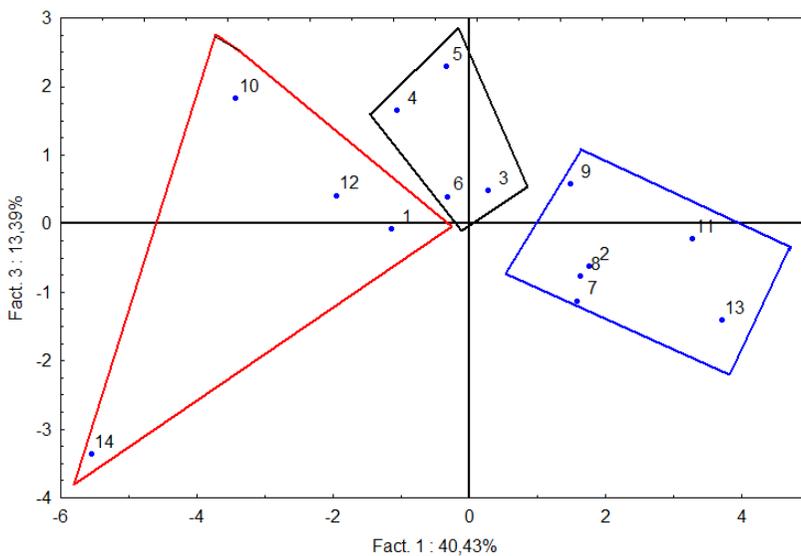


Figure 8. Espace des unités statistiques du plan factoriel F1 – F3

Indice de Qualité des Eaux (IQE)

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude a été définie sur la base de 13 paramètres physico-chimiques : pH, CE, turbidité, NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , le mercure, le plomb, le cyanure et le cadmium. Les eaux de qualités médiocre et mauvaise représentaient respectivement 7 et 14 % des eaux étudiées. Ainsi, plus de la moitié (soit 57 %) des eaux étudiées avaient un IQE supérieur à 100 qui représente la limite supérieure des eaux de bonne qualité (Figure 9). Les paramètres qui avaient le plus influencé la qualité de l'eau étaient la turbidité, le cadmium, le cyanure et le mercure. Ces paramètres étaient essentiellement des métaux, éléments toxiques et donc dangereux pour la santé humaine.

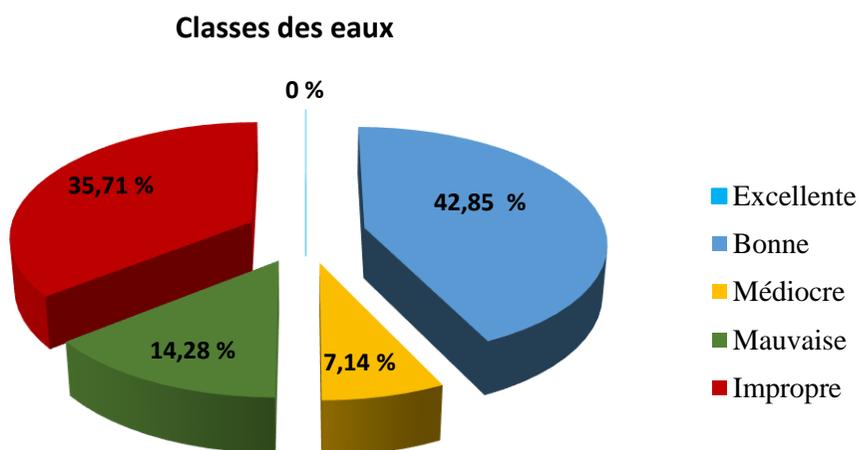


Figure 9. Illustration des différentes classes d'eaux

Discussion

Les eaux souterraines de la région d'étude sont dans l'ensemble faiblement minéralisées. La minéralisation totale était inférieure à 500 mg.L^{-1} . Cette minéralisation est caractéristique des eaux du socle de la Côte d'Ivoire ($\text{MT} \leq 1000 \text{ mg.L}^{-1}$) comme l'ont montré plusieurs auteurs (Lasm et al., 2008 ; Adiaffi et al., 2009 ; De Lasme, 2013). D'un point de vue physico-chimique, les eaux souterraines étudiées respectaient toutes les normes de potabilité de l'eau destinée à la consommation humaine. La température moyenne des eaux estimée à 26°C est caractéristique des eaux de l'Afrique de l'Ouest sous climat tropical humide à forte précipitation comme c'est le cas de la zone d'étude. Le pH variant de 5,17 à 8,5 présentait à 21% (de l'effectif) des eaux acides ($\text{pH} < 6$). Ces eaux étaient en grande majorité des eaux de puits captant les altérites. Cette acidité est principalement liée à la production de

CO₂ dans les couches superficielles du sol sous l'action des activités biologiques. Des résultats analogues ont été obtenus dans d'autres régions de socle de la Côte d'Ivoire (Lasm et al., 2008 ; Lasm et al., 2011 ; Kouassi et al., 2012). En ce qui concerne les ions majeurs, la forte domination des bicarbonates (HCO₃⁻) sur les chlorures et sulfates s'explique par la présence du CO₂ dans l'eau du sol. Ce CO₂ dans l'eau, facilite la production des ions HCO₃⁻. L'hydrolyse des minéraux silicatés (épidotes, chlorites et feldspaths) présents dans les roches (Assié, 2008) était le principal mécanisme de production des ions majeurs comme l'ont attesté les résultats de l'analyse en composantes principales. De tels résultats ont été mis en évidence par plusieurs auteurs (Goné et al., 2008 ; Ahoussi et al., 2011) dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire. L'ACP a aussi montré que l'infiltration superficielle et le lessivage des terrains non saturés participaient à la mise en solution des ions. C'est le phénomène d'infiltration de surface qui constitue la principale source de production des ions chlorures dans les eaux souterraines. Cependant, pour les eaux de puits, une origine anthropique est fort possible du fait du positionnement parfois trop rapproché de ces ouvrages des fosses septiques villageoises. En effet, selon Ahoussi et al. (2011), on peut également considérer une teneur élevée en Cl⁻ comme un indice de contamination humaine. L'urine humaine contient en moyenne 11 g.L⁻¹.

S'agissant des éléments toxiques, les résultats d'analyse ont montré que l'Arsenic (As) et le Chrome (Cr) étaient inexistantes dans les eaux étudiées. De prime abord, ces résultats pouvaient paraître en contradiction avec le contexte géologique de la zone échantillonnée. En effet, l'étude minéralogique réalisée par Assié (2008) a montré la présence de sulfures tels que l'Arsénopyrite (FeAsS) et la pyrite (FeS₂). Ainsi, on pourrait soupçonner la présence de de l'arsenic dans les eaux souterraines de la région. Cependant la dissolution des minéraux dans les roches est un processus lent, dépendant du temps de contact de l'eau avec les minéraux, la vitesse de circulation de l'eau. En outre, l'ACP réalisée a montré que les eaux étudiées étaient caractérisées par une minéralisation relativement rapide. Le temps de séjour des eaux dans les aquifères étant courts, le processus d'altération et d'hydrolyse des minéraux est alors limité. Cela n'a probablement pas permis la libération de l'arsenic dans l'eau. Tout comme l'arsenic et le chrome, le mercure (Hg) et le Cyanure (CN) n'ont pas été détectés dans les eaux des forages. Ces résultats d'analyse témoignent ainsi d'une origine superficielle pour les quelques valeurs observées dans les eaux de puits. En effet, les analyses ont révélé la présence du cyanure dans les eaux de puits, mais à l'état de traces. Ces teneurs relativement faibles dans ces aquifères d'altérites semblent normales selon Lions et al., (2009) pour qui, la présence de métaux lourds dans les sables est connue. Il en est de même pour le plomb. Cependant pour ce dernier, une valeur de 0,057 mg.L⁻¹ dépassant la limite autorisée par l'OMS (0,01 mg.L⁻¹)

a été retrouvée dans le puits de Kouamékro. L'origine naturelle du plomb peut être liée au fait que ce métal se substitue principalement au potassium, au strontium et au baryum. Ainsi on peut le trouver en trace dans des minéraux potassiques tels que les feldspaths ou les micas (Lions et al., 2009). Cependant, pour ces auteurs des fortes concentrations en plomb d'origine naturelle sont très rares même dans des contextes géologiques favorables car il s'agit d'un élément peu soluble, facilement adsorbables sur les argiles, les hydro (oxydes) et la matière organique et qui peut précipiter facilement sous forme de carbonates ou de phosphates. Cela est d'autant plus vrai que le puits de Kouamékro était très récent. Cette forte concentration en plomb serait alors d'origine anthropique notamment le lessivage des déchets domestiques. Les résultats les plus alarmants concernaient le cadmium, un métal très toxique qui pourtant, a été observé aussi bien dans les eaux de puits que dans les eaux de forage avec des teneurs au-delà de la limite admise pour les eaux de consommation humaine ($0,005 \text{ mg.L}^{-1}$). Ces fortes teneurs proviendraient de l'activité anthropique. En effet, Lions et al. (2009) ont montré qu'il est rare voire impossible de trouver naturellement du cadmium dans les eaux souterraines. Ainsi, une origine anthropique, notamment agricole, du cadmium semble évidente d'autant plus que la région constitue une importante zone agricole (Aké et al., 2009). Les fortes teneurs en cadmium, constituent la principale cause de la mauvaise qualité de la plupart des eaux étudiées, d'après les résultats de l'indice de qualité des eaux. Des résultats similaires ont été obtenues par Yapi et al. 2014 dans la zone minière de Hiré. Des études plus détaillées sur les eaux et les types d'engrais utilisés dans la région devront être réalisées afin de confirmer ou non l'origine agricole du cadmium.

Conclusion

L'étude des caractéristiques hydrogéochimiques des ressources en eaux souterraines du site minier d' Afema a été réalisée à partir de la combinaison des méthodes hydro-chimiques et de l'analyse statistique multivariée. Cette étude a montré que les teneurs moyennes des ions des eaux souterraines restaient, dans l'ensemble, conformes aux normes de potabilité recommandées par l'OMS pour les eaux destinées à la consommation humaine. Les eaux souterraines étudiées étaient caractérisées par une prédominance des ions HCO_3^- sur les Cl^- et SO_4^{2-} . Les ions Ca^{2+} représentaient les cations les plus importants, puis venaient ensuite les ions Na^+ , Mg^{2+} et K^+ . L'ACP réalisée a indiqué que la minéralisation des eaux de la zone minière était contrôlée par deux grands phénomènes : la minéralisation liée au temps de séjour et la minéralisation par infiltration superficielle et lessivage des terrains non saturés. Aussi, cette étude a montré que les eaux souterraines de la zone d' Afema présentaient toutes des teneurs élevées en cadmium et certaines en plomb. Cependant, bien que l'activité minière se soit développée dans la

région (1992-1998), les eaux souterraines n'ont pas été contaminées par le cyanure.

Remerciements

Les auteurs traduisent leurs sincères remerciements à la société Taurus Gold pour l'accès accordé pour la campagne d'échantillonnage, les notables des village Aboulé et Kouakro pour leur disponibilité ainsi que les membres du Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement de l'UFR-STRM de l'Université de Cocody, Abidjan ainsi que ceux du Laboratoire du Génie de L'Environnement Industriel de l'IMT Mines Alès.

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêt.

References:

1. Adiaffi B., Marlin C., Oga Y.M.S., Massault M., Nauret A., Biemi J. (2009). Palaeoclimatic and deforestation effect on the coastal fresh groundwater resources of SE Ivory Coast from isotopic and chemical evidence. *J. Hydrol.*, 369: 130-141.
2. Ahoussi K.E. (2008). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat Unique, Univeristé de Cocody, Abidjan, 270p.
3. Ahoussi K.E., Oga Y.M.S., Yao B.F., Kouassi A.M., Soro N., Biémi J. (2011). Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire : cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5(5): 2114-2132.
4. Aké G.E., Dongo K., Kouadio B.H., Dibi, Saley M.B., Biémi J. (2009) : Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, vol. 31 (1) : 157-171.
5. Assié K.E. (2008). Lode gold mineralization in the Paleoproterozoic (Birimian) volcano-sedimentary sequence of Afema gold district, southeastern Côte d'Ivoire, PhD thesis, Technical University of Clausthal, Clausthal, 198p.
6. Castilla-Gómez J. & Herrera-Herbert J. (2015). Environmental analysis of mining operations: Dynamic tools for impact Assessment. *Minerals Engineering* 76 : 87–96.

7. Coulibaly A.S., Mondé S., N'guessan A.Y., Aka K. (2011). Spéciation chimique des éléments traces métalliques dans un environnement lagunaire confiné : la baie de Bietry. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5(6): 2543-2556.
8. Dahariya NS, Ramteke S, Sahu BL, Patel KS. Urban Groundwater Quality in India. *Journal of Environmental Protection*, 7 : 961-971.
9. De Lasme O.Z. (2013). Contribution á une meilleure connaissance des aquifères fissurés du socle précambrien : cas de la région de San-pédro (sud-ouest de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat. Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, 209p.
10. Goné D.L., Adja J.T., Kamagaté B., Kouamé F., Koffi K., Savané I. (2008). Élimination du fer et du manganèse par aération–filtration des eaux de forage en zone rurale dans les pays en développement : cas de la région de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 19(3): 558-567.
11. Guillén M.T., Delgado J., Albanese S., Nieto J.M., Lima A., De Vivo B. (2012). Heavy metals fractionation and multivariate statistical techniques to evaluate the environmental risk in soils of Huelva Township (SW Iberian Peninsula). *Journal of Geochemical Exploration*, 119-120 : 32–43.
12. Idris, A.M. (2008). Combining multivariate analysis and geochemical approaches for assessing heavy metal. *Microchemical Journal*, 90 : 159–163.
13. Keumean K.N., Bamba S.B., Soro G., Soro N., Métongo B.S., Biémi J. (2013). Concentration en métaux lourds des sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé. *Journal of Applied Biosciences*, 61: 4530-4539.
14. Kogel JE, Trivedi NC, Barker JM, Krukowski ST. 2006. *Industrial Minerals Rocks: Commodities, Markets, and Uses*, (7th edn). SME-Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
15. Kouassi A.M., Ahoussi K.E., Yao K.B., Aké A.Y., Biémi J. (2012). Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6(1): 504-518.
16. Kouzana L., Ben Mammou A., Gaaloul N. (2007). Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop.*, 31: 57-70.
17. Lakhili F., Benabdelhadi M., Bouderkha N., Lahrach H., Lahrach A. (2015). Etude de la qualité physicochimique et de la contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Beht (Maroc). *European Scientific Journal*, vol.11, No.11, pp. 1857- 7431.
18. Lasm T., Yao K.T., Oga M.S., Kouamé K.F., Jourda P., Kouadio K.E., Baka D. (2008). Analysis of the Physico-Chemical Characteristics of

- Groundwater in Proterozoic Land Region of the Tiassale Area (Southern Cote D'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 20 (3) : 526-543.
19. Lasm T., De Lasm O., Oga M.S., Youanta M., Baka D., Kouamé K.F., Yao K.T. (2011). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5(2): 642-662.
 20. Lions J., Pinson S., Parizot M. (2009). Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines de la Guyane. Rapport BRGM RP-57860- FR, Grenoble, 119p.
 21. Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A., Vanclooster M., (2011). Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc. *Afrique Sciences*, 7(3): 34-48.
 22. Monteiro F.F., Cordeiro R.C., Santelli R.E., Machado W., Evangelista H., Villar L.S., Viana L.C.A., Bidone E.D. (2012). Sedimentary geochemical record of historical anthropogenic activities affecting Guanabara Bay (Brazil) environmental quality. *Environ. Earth Sci.*, 65 : 1661-1669.
 23. Outtara Z., N'cho O.C., Gouedji G.F.E., Ouattara G. & Coulibaly Y. (2022). Evaluations Géologique et Environnementale des Activités Minières Artisanales Liees à L'or de Doumbiadougou, Duekoue, Ouest de la Cote d'Ivoire. *ESI Preprints*.
 24. Oga M.S., Lasm T., Yao K.T., Soro N., Saley M.B., Kouassi D., Gnamba F. (2009). Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 31 (1): 72-87.
 25. Omanović D., Pizeta I., Vukosav P., Kovács E., Frančsković-Bilinski S., Tamás J. (2015). Assessing element distribution and speciation in a stream at abandoned Pb-Zn mining site by combining classical, in-situ DGT and modelling approaches, *Sci. Total Environ.*, 511 : 423-434.
 26. Othmani M.A., Souissi F., Silva E.F., Coynel A. (2015). Geochemistry and potential environmental impact of the mine tailings at Rosh Pinah, southern Namibia, *Journal of African Earth Sciences*, 111 : 231-243.
 27. Ramakrishnaiah C.R., Sadashivaiah C., Ranganna G. (2009). Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnatak State, India. *E-Journ of Chemis*, 6(2): 523-530.
 28. Thierrin J., Steffen P., Cornaz S., Vuataz F., Loaser. (2003). Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Édité par l'Office de l'Environnement des Forêts et du Paysage et la Société Hydrogéologique de Suisse, 91p.

29. Shrestha S.M., Rijal K., Pokhrel R.M. (2016). Assessment of Heavy Metals in Deep Groundwater Resources of the Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Environmental Protection*, 7 : 516-53.
30. Sielaff K., Einax J.W. (2007). The application of multivariate statistical methods for the evaluation of soil profiles. *Journal of Soils and Sediments*, 7 : 45–52.
31. Yao K.A.F., Salze D., Lopez-Ferber M., Lasm T., Belcourt O. (2017). Impact of an Abandoned Mine on Surrounding Soils, Surface Water and Stream Sediment: Case of SOMIAF Gold Mine, Côte d’Ivoire. *International Journal of Environmental Science and Development*, 8 (9) : 642 – 646.
32. Yao K.S.A. & Ahoussi K.E. (2020). Caractérisation physico-chimique des eaux de surface dans un environnement minier du centre-ouest de la Côte d’Ivoire : Cas du Département de Divo. *European Scientific Journal*, vol.16, No.12, pp. 293 – 315.
33. Yapi Y.H.A., Dongui B.K., Trokourey A., Barima Y.S.S., Essis Y., Atheba P. (2014). Evaluation de la pollution métallique des eaux souterraines et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Côte d’Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 8(3): 1281-1289.